

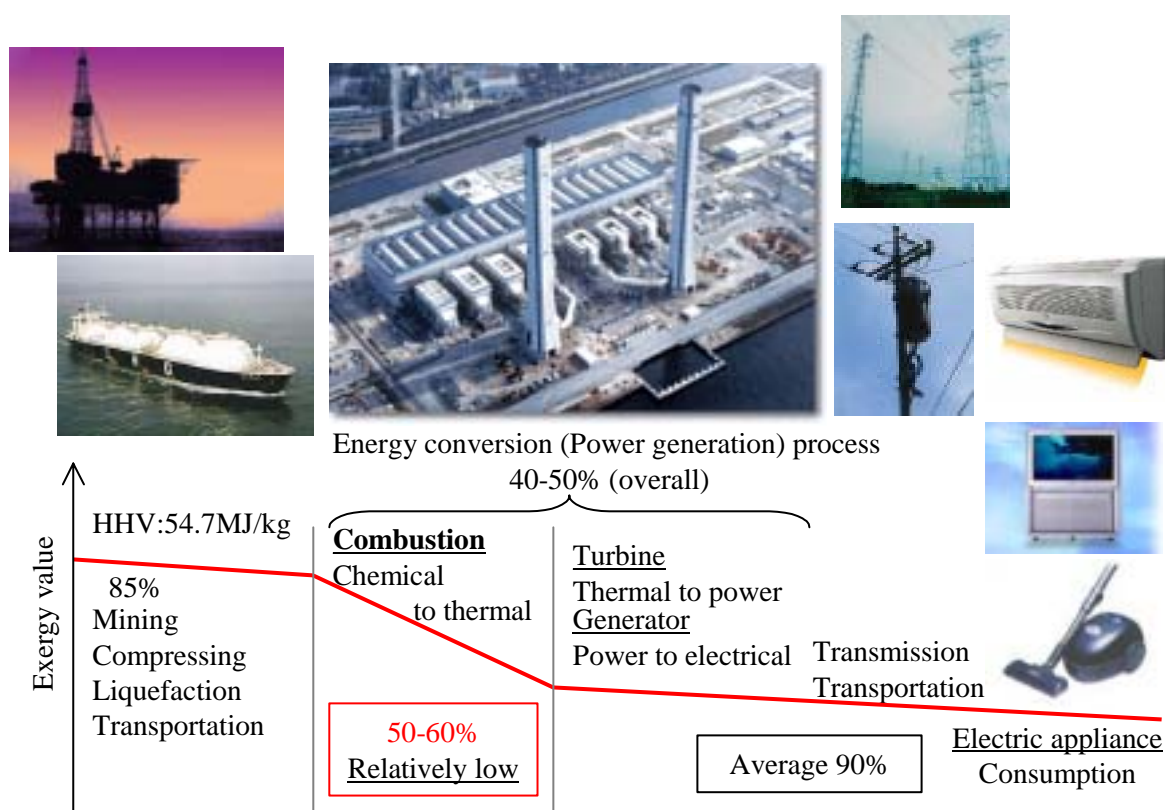
第1章

序論

1.1 研究の背景と目的

1.1.1 ガスタービンにおけるエネルギー変換効率の改善

近年、環境問題は大きくクローズアップされており、なかでも地球温暖化には非常に関心が高くなっている。日本国内のエネルギーは 90% 以上も輸入に頼っていることから、経済産業省や NEDO の主導のもと、研究者・技術者は高効率なエネルギー変換技術、省エネルギー消費技術の開発に努力してきた。図 1-1 に、エネルギーのライフサイクルにおける天然ガスを例にしたエクセルギーの推移を示す。化石エネルギーである天然ガスは資源として採掘され、圧縮しながら-162℃まで冷却・液化してから輸送される。天然ガスの高位発熱量(HHV)は約 54.7MJ/kg であるが、その約 15%のエネルギーを用いて日本国内に到達する。ここからは電気事業者の領域となり、燃料の持つ化学エネルギーをまず熱エネルギーに変換して動力を取り出す。主要な発電機器であるガスタービンや蒸気タービンの発電



• Nuclear power 35%, Hydraulic power 80%, photovoltaic conversion 15%

Fig. 1-1 Energy life cycle and conversion efficiency on each process

システムを例に取れば、ガスタービン燃焼器やボイラにおいて熱エネルギーに変換している。天然ガスを空気当量比1で燃焼した場合の断熱火炎温度は 2000℃ 以上となるが、実際にはガスタービン翼やボイラ蒸発管のメタル表面温度がこの温度に耐えられないため、大量の空気で希釈して温度を下げている。ガスタービンシステムでは、熱エネルギー変換後の最高温度はタービン入口温度 (Turbine Inlet Temperature, 以下 TIT と略記) で示され、技術の進歩で最新の H 型ガスタービンシステムでは 1500℃ を達成している。しかし、それでもこの過程では 50～60% 程度の変換効率にとどまる。熱エネルギーから動力エネルギーへの変換機器がタービン、動力エネルギーから電気エネルギーへの変換機器が発電機である。電気エネルギーは送電・変電を経て電気事業者から需要家に供給され、各消費機器で最終的には全て熱となって捨てられる。熱から送変電に至るまでの効率は概ね 90% 以上であり、消費機器でも省エネルギー技術により究極的に効率が改善されているが、それに比べて化学 - 熱エネルギーの変換は改善されてきているとはいえ、未だ低くとどまっているのが現状である。

この化学 - 熱エネルギー変換効率を向上させるために、従来は熱エネルギーの最高温度を上げる方法が採られてきた。図 1-2 に、作動流体を大気圧の空気とした場合のエクセルギー率と温度に対する関係⁽¹⁾を示す。ガスタービンの場合、無冷却で耐えられる翼のメタル温度は約 900℃ であり、それ以上の温度域では金属材料開発やフィルム冷却翼設計技術を駆使して TIT を 1500℃ まで高めてきた。さらに TIT を上げるには、翼をセラミックにするなど大幅な技術革新が必要とされるが、莫大な開発コストがかかる。しかしながら、図 1-2 に見るように 1500℃ 以上に温度を上げてエクセルギー率の向上幅は小さくなるため、費用対効果が薄いと考えられる。

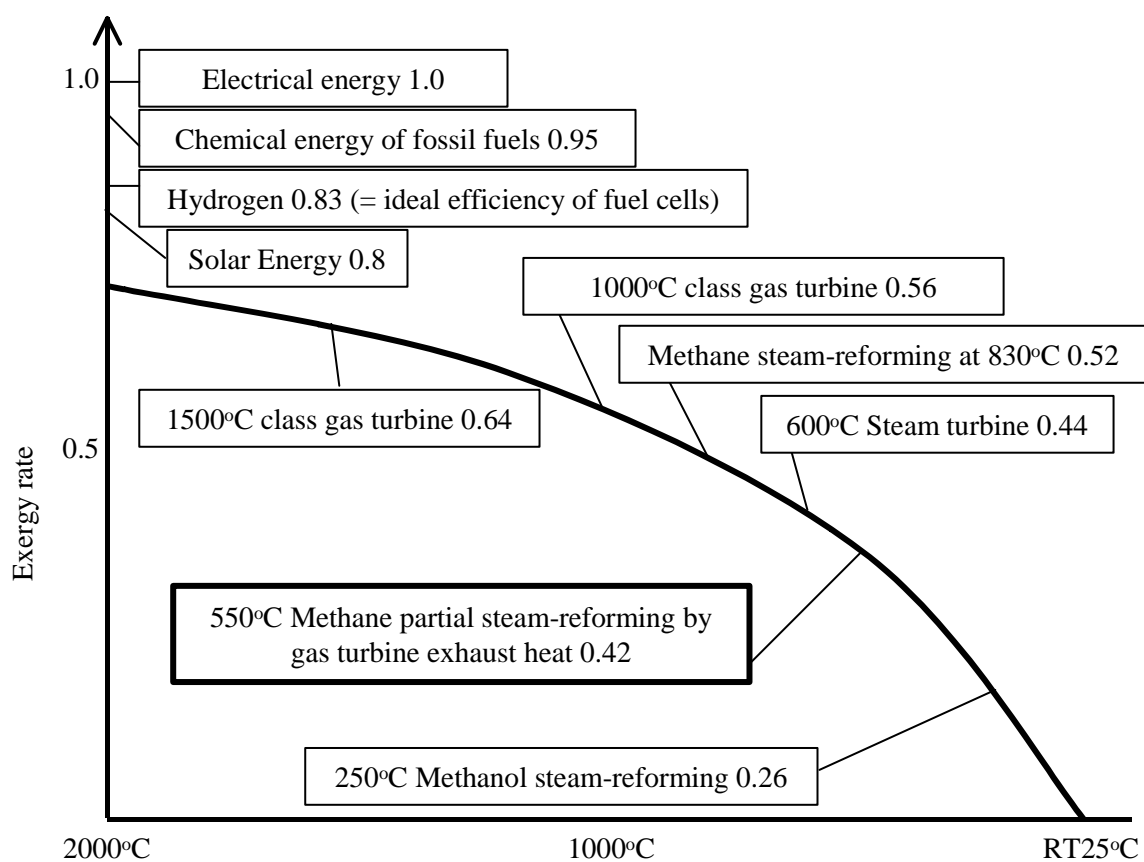
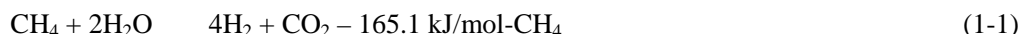


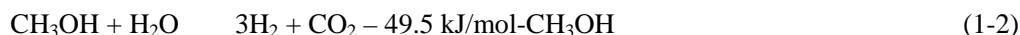
Fig. 1-2 Exergy rate vs. temperature (Air 103kPa)

燃焼過程を伴う化学 - 熱エネルギー変換において温度を上げるアプローチでは課題が多いが、一方で、エネルギーのカスケード利用や 600℃ 以下の中低質熱を再生し、エネルギーの質を向上させるアプローチで省エネルギーを目指す研究が種々なされている。その中でも、炭化水素系燃料を水蒸気改質反応して水素を生成するプロセスを利用するものは最も重要なテーマの一つである。式(1-1)から(1-3)に、二、三の炭化水素を例に取って水蒸気改質反応を示す。

・メタン水蒸気改質・・・反応温度 約 830



・メタノール水蒸気改質・・・反応温度 約 250



・ジメチルエーテル(Dimethyl Ether, DME)水蒸気改質・・・反応温度 約 400



これらの反応は化学工業的にも重要であり、反応促進に必要な触媒も用途に合わせて豊富に供給されている。いずれも改質されたガスは水素を多く含むガス(水素リッチガス)である。

水素の大きな特徴の一つとして、炭化水素系化石燃料より低いエクセルギー率が挙げられる。図 1-2 に示したように、気体の炭化水素系化石燃料のほとんどは 95% 以上⁽²⁾であるが、水素のエクセルギー率は 83% と 10% 以上低くなっている。例えば、図 1-2 に見るように、燃焼により 1500℃ の高温空気を生成したとすれば、エクセルギー率は 64% であり、95% の燃料を用いたとすればこの過程で 31% のエクセルギー損失が生じる。この損失は本来、超高温を発することのできる質の高い燃料をわざわざ空気で希釈して実用可能な温度まで冷却していることに起因するものである。一方、水素を燃焼させた場合では、燃焼時の到達温度が低くなるため必然的にエクセルギー損失が 19% に低減される。さらに、水素自体のエクセルギー率以外にも、水素を生成する主なプロセスである水蒸気改質のエクセルギー率すなわち温度にも注目すべきである。例えば、式(1-1)のメタン改質反応は 830℃ であれば十分進行するが、これは 0.52 のエクセルギー率に相当する。また、式(1-2)のメタノール改質であれば 250℃、0.26 のエクセルギー率であればよい。つまり、改質反応を中低質排熱の回収に用いれば、0.52 や 0.26 のエネルギーの質を 0.83 にまで高めることが可能であり、これが化学 - 熱エネルギーの変換効率改善において機器の高温化以外のもう一つのアプローチ方法であると言える。

また、水素は燃焼を伴う化学 - 熱エネルギーの変換プロセスを経由しない化学 - 電気エネルギーの直接変換、すなわち燃料電池でも利用することができる。燃料電池における水素は、通常、炭化水素燃料を式(1-1)～(1-3)で示した改質反応で生成し、改質に必要な熱源はオフガスと呼ばれる燃料電池本体から出る未利用可燃成分を燃焼させて得ている。この燃焼器による水素生成も、排熱で水素を生成させるほうが有効であり、ガスタービンと組み合わせた燃料電池 - ガスタービンハイブリッドタイプの発電システムの研究⁽³⁾も盛んである。

このように、本研究の背景の一つとして、主要なエネルギー変換機器の一つであるガスタービンを、TIT を無理に高温化することなく高効率化させる方法の必要性が挙げられ、その一つとして水素生成を伴う化学的な排熱回収は、有効な手段であると言える。

1.1.2 ガスタービンコージェネレーションにおける課題

エネルギーの有効利用や CO₂ 排出削減に関心が高まる中、分散型発電システムは電力と熱の利用、すなわちコージェネレーションが可能であり、電力の規制緩和の流れもあって、今後の一段の普及が

予測される⁽⁴⁾。従来、中小規模の分散電源ではディーゼルエンジンやガスエンジンを使ったコージェネレーションシステムが利用されてきたが、ガスタービン技術の進歩によって中小型ガスタービンを用いた高効率なシステムが開発されている。ガスタービンコージェネレーションシステムは、概してレシプロエンジンに比べて低騒音・低 NO_x であるため、環境規制の厳しい都市部において有力な選択肢となり得るが、単純開放のシンプルサイクルでは、総合熱効率は 80% 程度まで達成されるのに対し、発電効率は LHV (低位発熱量) ベースで 35% 以下とレシプロエンジンよりも低いのが現状である。また、発電効率の低いコージェネレーションシステムでは、熱 / 電気出力比 (熱電比) が大きいため、ユーザーの実際の負荷パターンとのマッチングが難しく、電力に対して熱が余ることが多い。その結果、年間を通じての総合的なエネルギー利用率が思ったほど上がらないといったことが考えられるため、コージェネレーションシステムの広範囲な普及にとって解決すべき課題となっており、これが本研究のもう一つの背景である。

これまで述べた 2 つの背景を踏まえ、本論文では「化学再生ガスタービンシステム」をテーマとして取り上げる。化学再生ガスタービンシステムは、TIT を高温化することなくエネルギー変換効率を向上させ、コージェネレーションにおける余剰熱を電力に変換することのできる解決策の有力な手段である。この研究の目的は、化学再生ガスタービンシステムを具現化すべく、必要なシステム解析や構成要素の開発を行い、予測した高い発電効率の達成と起動停止を含めた実際の運転が可能となる見通しを得て、最終的には実証試験への準備を完了させることにある。このため、論文の全章を通じ、既存の蒸気噴射が可能な中容量のガスタービンとマイクロガスタービンを具体例にした化学再生ガスタービンシステムを対象に研究を進めている。なお、化学再生ガスタービンには様々な燃料を適用することができるが、本論文では主に天然ガスに焦点を絞って構成する。

1.2 排熱回収における従来の技術

ガスタービンの排熱を回収して電力に変換するシステムは、これまでにいくつか開発されており⁽⁵⁾、ガスタービン排気と熱交換する流体によって異なるシステム構成となっている。表 1-1 に、ガスタービンにおける排熱回収システムの一覧を示す。

再生サイクル⁽⁶⁾は最も単純であるが、空気は流量が多いため出力が大きくなると熱交換器が非常に大きくなる。従って、主に 300kW 以下のマイクロタービンクラスで用いられているが、熱電比が可変ではない。なお、本論文では、改良型ガスタービンサイクルを熱回収媒体で区別するため、再生サイクルを敢えて空気再生サイクルと称する。

蒸気噴射サイクル (Steam Injection Gas Turbine Cycle, 以下 STIG と略記) は、排熱回収ボイラを用いて発生させた蒸気を燃焼器に投入するサイクルであり、熱電比を変えられるシステムが実用化⁽⁷⁾しているが、注入した蒸気がそのまま大気中に放出されるため、蒸気の潜熱に相当する多量のエネルギーを捨てることになる。

これに対し、化学再生サイクル (Chemically Recuperated Gas Turbine Cycle, 以下 CRGT と略記) では、水蒸気と混合した燃料を、水素リッチガスに転換させる改質反応によって排熱を回収する。化学再生サイクルは、数 MW 中規模ガスタービンからマイクロタービンまで同等の発電効率の向上が望めるとともに、蒸気噴射よりも少ない蒸気量で発電効率を高めることができ、熱電可変範囲の大きいコージェネレーションシステムを組むことができる。

Table 1-1 Summary of heat recovery systems for gas turbine

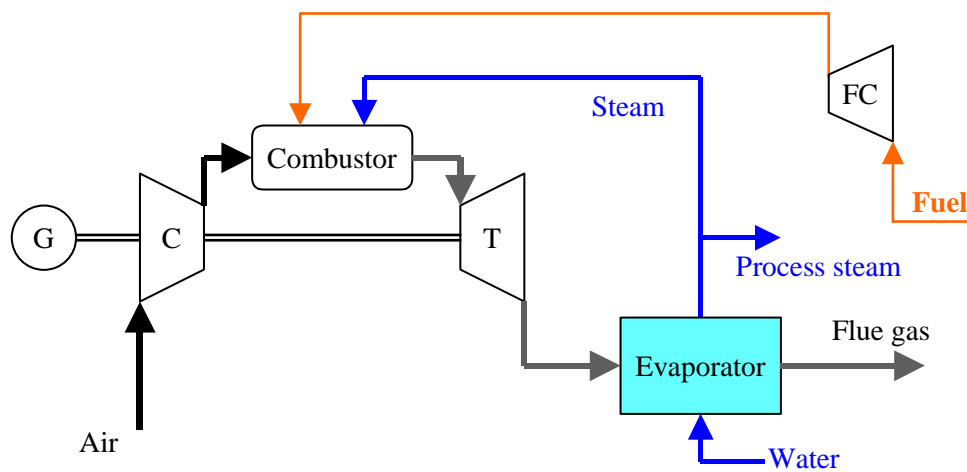
Gas turbine (GT) cycle name	Heat recovery method	Suitable gas turbine range and notes
(Air) Recuperated GT cycle	Enthalpy of compressor air	Suitable for MGTs. (Large heat exchanger is required.)
Steam Injection GT cycle (STIG, Cheng cycle)	Steam enthalpy	Suitable for thousands kW GTs. Proven technology and practical use. Flexible heat and power ratio. (Combined cycle recovers heat by closed system, i.e. Rankine cycle, and it is suitable for large scale GTs.)
Chemically Recuperated GT cycle (CRGT)	Fuel and steam enthalpy, and chemical enthalpy change due to steam reforming	Suitable for small and medium scale GTs. More flexible heat and power ratio. Feasibility has been studied. CRGT with methanol steam reforming have been demonstrated by Hitachi Zosen in NEDO project.

1.3 化学再生ガスタービンの概要と従来の研究

化学再生サイクルは、すでに実用化されている蒸気噴射サイクルを基にすると理解しやすい。図 1-3 および 1-4 に、蒸気噴射および化学再生のガスタービンシステムブロック図をそれぞれ示す。図 1-3 に示す蒸気噴射では、ガスタービンの排熱で発生させた蒸気を注入することで蒸気の蒸発潜熱と過熱分のエンタルピー変化で排熱を回収している。一方、図 1-4 に示す化学再生ではこの蒸気噴射の回収熱に加えて、化学反応によって燃料の保有エンタルピーも増加させる。燃料である天然ガスは蒸発器で発生した水蒸気の一部と混合され、改質器を通して燃焼器へ送られる。改質器には触媒が充填されており、式(1-1)～(1-3)で示した水蒸気改質反応を生じさせる。化学再生では、この反応の吸熱性を用いることで排熱を水素リッチガスの化学的なエネルギーに変換する。つまり、メタンを直接燃焼させるよりも改質して得られた水素リッチガスを燃焼させた方が、エネルギー変化が大きくなる。燃焼器では天然ガスではなく水素リッチガスが燃焼するが、燃焼後のガス、すなわちタービン作動ガスは蒸気と CO_2 を含む高温空気であり、蒸気噴射と全く同じである。化学再生システムをマイクロガスタービンに代表される空気再生サイクルに用いることも可能であり、その場合、改質器と蒸発器の間に空気再生器が配置されることになる。

燃料電池の改質器や水素精製などの化学プラントにおいては、水素を得ることが目的であるから、メタンが水素リッチガスに転化する転化率が 100% 近くまで達するように水蒸気改質反応は 800 以上の高温で行われる。一方、ガスタービン排気温度は 550 程度であり、この温度レベルでは部分的にしか改質反応が進行しないが、メタンの改質反応の化学エンタルピー変化が大きいため大幅なエネルギー変換効率、すなわち発電効率の向上が望める。化学再生サイクルは蒸気噴射サイクルの発展形と捉えることができ、発電効率は蒸気噴射を上回ることが可能である。両者の比較のため、今、システムの最終排気温度が同じであったとする。図 1-3 に見るように、蒸気噴射サイクルではガスタービン排気温度 (Turbine Exhaust Temperature, 以下 TET と略記) から最終排気温度までの排熱回収を蒸気の

みで行うのに対し、化学再生サイクルでは、燃料の機械的エンタルピー(顕熱)に加え、化学反応によるエンタルピー変化でも排熱回収するため、蒸気量が少なくて済む。蒸気噴射サイクルにおける蒸気および化学再生サイクルにおける改質ガスは、いずれもガスタービン作動流体となって系外へ放出されるが、このとき蒸気の持つ潜熱は捨て去ることになるため、蒸気量の少ない化学再生サイクルが必ず発電効率が高くなる。一方、運用方法から考えれば、両者で同じ量の蒸気を用いると仮定することになるが、同様な理由により化学再生サイクルの排熱回収量が必ず多くなることから、最終排気温度が低くなり、発電効率が蒸気噴射サイクルよりも高くなる。すなわち、化学再生サイクルはガスタービンシステムの発電効率向上において、究極の排熱回収方法であると言える。



C: Compressor, T: Turbine, FC: Fuel compressor, G: Generator

Fig. 1-3 Block diagram of STIG system

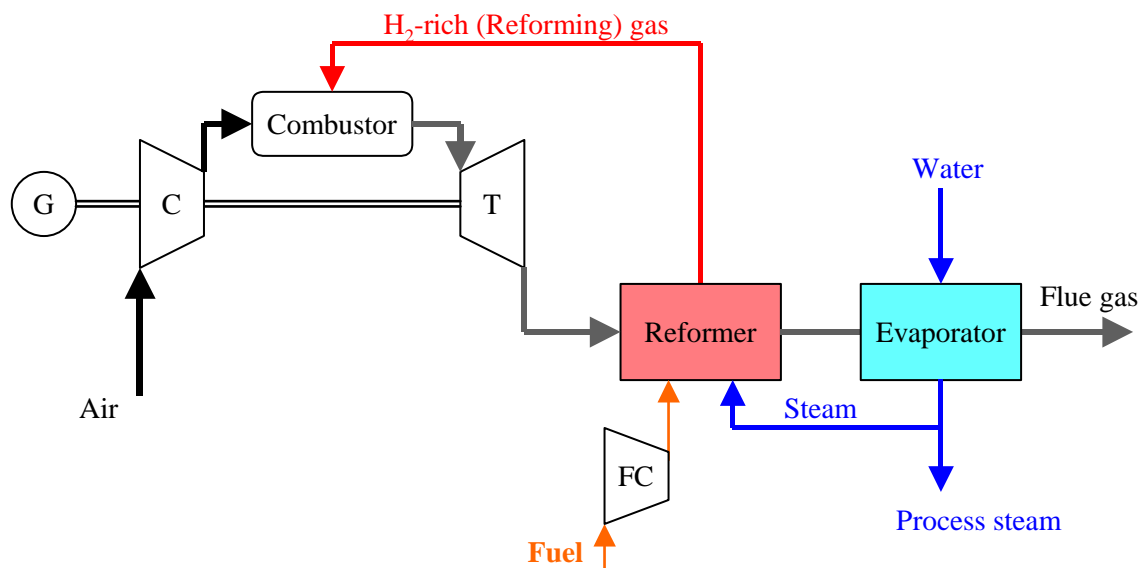


Fig. 1-4 Block diagram of CRGT system

改質反応の吸熱を排熱回収に用いるシステムは、古くから研究されており、例えば、NEDOの「石油火力発電所メタノール転換等実証試験」プロジェクトでは、300 程度の温度で改質するメタノールを用いた 1MW クラスガスタービンによる実証試験⁽⁸⁾⁽⁹⁾を熱媒加熱方式の改質器を用いて行っている。また、ガスタービンではなく、レシプロエンジンをを用いたメタノール改質ガスエンジンシステムも検討されている。⁽¹⁰⁾

一方、燃料の主力となる天然ガス改質型では、1980 年代から机上検討⁽¹¹⁾⁽¹²⁾⁽¹³⁾が散見されるが、具体的な応用研究がほとんど見当たらない。いずれの文献にもコンパクトな改質器の設計が困難であると述べられており、これまで実機への適用研究がされなかった原因と考えられる。

1.4 研究の方法と本論文の概要

本研究では、燃料にメタンあるいはメタンを主成分とする天然ガス・都市ガスを用い、ガスタービンの排熱で部分的に改質した化学再生ガスタービンのシステムと要素研究に焦点を当てており、その具体的な方法として、まずは化学再生サイクルのシステム性能を予測し、基礎資料となる熱・物質収支を明らかにする。一方、改質反応を生じさせる触媒については、改質試験装置を用いて反応速度データを実測し、反応速度式の各係数を求める。熱・物質収支データと実験的に求めた反応速度式を組み込んだ数値解析により、キーコンポーネントである改質器を工学的な方法で試設計し、改質試験結果による考察を踏まえて設計方法を確立する。また、改質器モジュールによる実機を想定した改質試験および燃焼試験を実施し、設計した改質器とシステム性能予測の妥当性の検証を行う。さらに、一步進めた設計として、市販されている 4MW シンプルサイクルガスタービンにそのまま適用できる改質器を(社)火力原子力発電技術協会の「発電用火力設備の技術基準、省令・告示及び解釈」に沿って設計し、基本計画図を作成する。本研究で設計する改質器は、従来、困難とされてきたガスタービン排気ダクトに直接取り付けることのできる新しい構造を採用しており、数値解析の温度分布予測を条件として与えた有限要素法による構造解析の結果に、ASME 技術標準の応力評価コードによる検討を加え、構造的な検証を行う。

本論文では、化学再生ガスタービンシステムの実現に必要な開発要素を洗い出し、それぞれの要素について詳細に研究を進めている。また、これらの要素研究は最終ゴールである実証試験への準備に向けて密接に関係しており、一連の研究フローを構成している。図 1-5 に、本論文で取り扱う化学再生ガスタービンシステムの要素研究の相関と流れをブロック図で示す。本論文では、上述の研究方法が図 1-5 の流れに沿い、第2章以降を次のように構成している。

第2章 プロセスシミュレータにより、ガスタービンシステムの検討を行い、システムの方向性を決定するとともに熱・物質収支を明らかにする。対象となるガスタービンシステムは、4MW のシンプルサイクルガスタービンと 75kW のマイクロガスタービンである。この研究は、1998 年から 2000 年にかけて、東芝の社内研究として実施された二つのテーマの成果をまとめたものである。

第3章 化学再生に必要と考えられる水蒸気改質用触媒の選定条件を基に、Ni, Ru 系の触媒について触媒性能評価試験を行い、反応速度式を得る。この研究は、1998 年から 2000 年にかけて、東芝の社内研究として実施された二つの研究テーマの成果をまとめたものである。

第4章 第3章で得られた反応速度式を組み込んだ改質器の設計コードを開発し、設計コードの妥当性を単管の充填層試験で評価・修正する。この段階で、第2章で得られた熱・物質収支をベースに、実機の概念設計を固める。この研究は、1998 年から 2000 年にかけて、東芝の社内研究として実施さ

れた二つの研究テーマの成果をまとめたものである。

第5章 概念設計の熱・物質収支のもと、水蒸気で希釈された低カロリーガスの可燃範囲を試験的に調査するとともに、概念設計の改質器モジュールによる改質性能を試験的に評価する。この研究は、2001年に東芝と関西電力の共同研究成果をまとめたものである。

第6章 これまでの結果を反映して詳細設計を行い、基本計画図を作成するとともに、そのクリティカルな部分について構造解析および応力評価を行う。この研究は、2002年に東芝と関西電力の共同研究成果をまとめたものである。

第7章 シンプルサイクル、空気再生サイクル、蒸気噴射サイクル、メタノール改質型化学再生サイクルおよび天然ガス改質型化学再生サイクルの5つのサイクルについて、コスト評価を含め、総合的に比較検討する。この研究は、2002年に東芝と関西電力の共同研究成果をまとめたものである。

第8章 第2章から第7章までを総括する。また、研究展望としてガス分離と組み合わせた化学再生サイクルや軽油代替燃料として注目される DME を用いた化学再生ガスタービンについて述べ、研究の詳細を付録 A および付録 B として追加する。この研究は、1998年から2001年にかけて、東芝の社内研究として実施された二つの研究テーマの成果、2000年から2001年にかけて、エネルギー総合工学研究所委託研究の WE-NET タスク 12 「革新的、先導的技術に関する調査・研究」として実施した「非平衡メタン改質型ガスタービンシステムの調査研究」の成果、経済産業省 資源エネルギー庁「DME 燃料利用機器開発費補助金」の補助事業として2003年に実施した「DME 化学再生発電システムの開発」の研究成果の一部をまとめたものである。

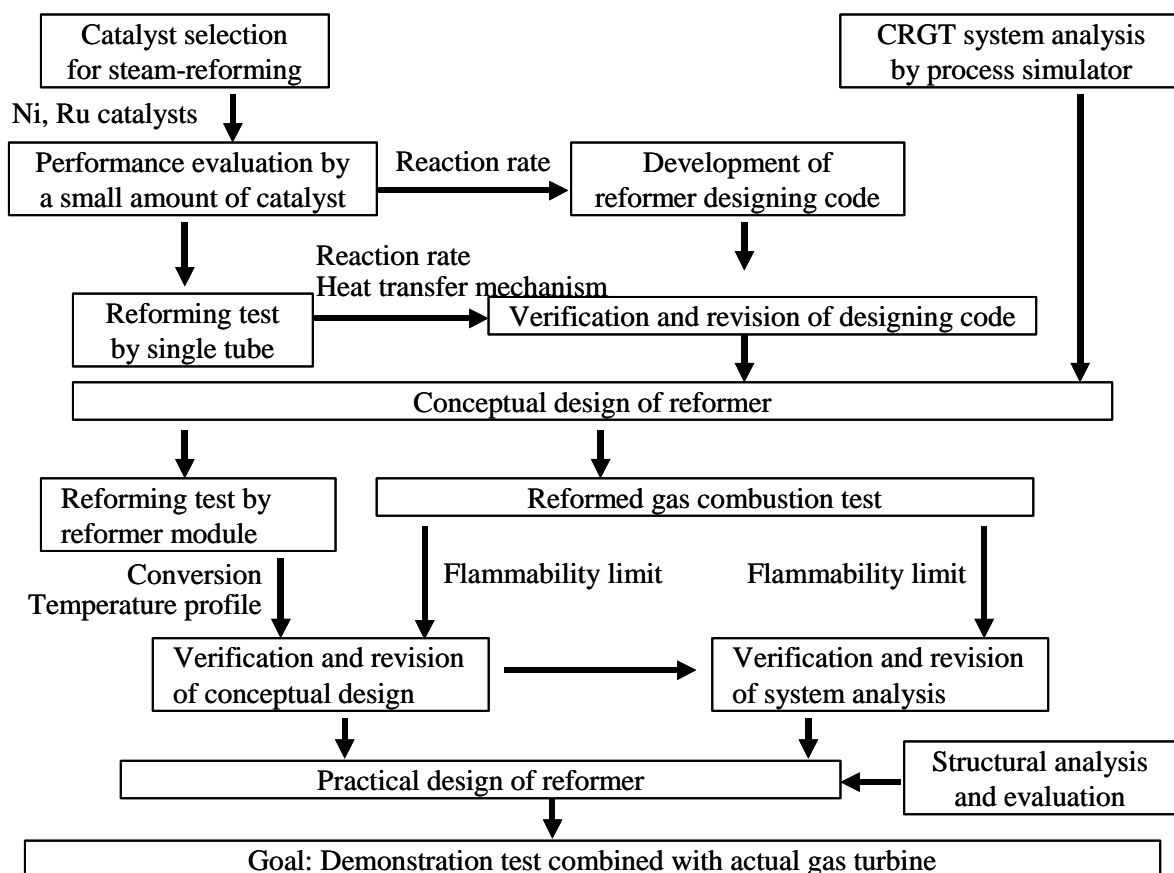


Fig. 1-5 R&D flow diagram

1.5 参考文献

- (1) 土方, マルチパスエネルギー・エネルギー・リサイクル・システムの実現に向けて 14-21
- (2) 日本規格協会, 有効エネルギー評価方法通則, JIS Z9204
- (3) 岩成・宮内・伊藤・恩田・榊・永田, 平板型固体酸化物燃料電池とガスタービンの複合発電のサイクル計算, 機論, **68**-673, B (2002), 214-220
- (4) 日本コージェネセンター, コージェネレーションシステム年間動向レポート(2001 年度), (2002)
- (5) 日本工業出版, クリーンエネルギー, 特集[熱電可変 出力可変], 1997 年 7 月号, (1997)
- (6) 辰巳, 再生サイクガスタービン「S7A-01」の開発, 川崎重工技報, 148 号, (2001)
- (7) 熱電比可変形ガスタービンコージェネ設備, 川崎重工技報, 148 号, (2001)
- (8) 長屋・尾白・伊藤・吉野, メタノール改質型発電実証試験, 日立造船技報, **54**-3 (1993), 24-28
- (9) Institute of Applied Energy, “Conceptual Design of Methanol Steam-reforming Gas Turbine”, *NEDO Contract research report*, (1984)
- (10) 小松・青山・石渡・高木・首藤・山根・中島, ハイブリッド電気自動車用低エミッション高効率メタノール/ガソリン改質ガスエンジンシステムの研究開発, NEDO 平成 10 年度新規産業創造型提案公募事業 プロジェクト成果報告, (1998)
- (11) Kesser, K. F., Hoffman, M. A. and Baughn, J. W., “Analysis of a Basic Chemically Recuperated Gas Turbine Power Plant”, *J. Eng. for Gas Turbines and Power*, **116** (1994), 277-284
- (12) Final report to GRI, “Evaluation of Advanced Gas Turbine”, GRI-93/0250, (1993)
- (13) Vakil, H. B., “Thermodynamic Analysis of Gas Turbine Cycle with Chemical Reactions”, *ACS* 0097-6156/83/0235, (1983), 105-117

This page intentionally left blank.